我国空间科学任务“四个科学”特点及管理实践

——以中国科学院空间科学战略性先导科技专项为例

李 超* 郑耀昕
中国科学院国家空间科学中心 北京 100190

摘要 文章指出我国空间科学任务的核心特点是科学驱动，具体表现为“四个科学”特点，即科学目标、首席科学家、科学载荷和科研院所。阐述了针对“四个科学”特点的管理实践，即坚持以科学目标为牵引，以首席科学家为科学导向，以科学载荷为抓手，以科研院所为依托，促进科学与技术、科学与工程的有机融合，确保工程进度和质量，努力促进成果产出的最大化。通过审视空间科学任务的特点，梳理管理实践和对策，并对后续任务管理提出建议，有助于进一步提升管理能力，对我国空间科学长期可持续发展颇有裨益。

关键词 空间科学任务，科学目标，首席科学家，科研院所，科学载荷，空间科学先导专项

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20190826001

空间科学是以航天器为主要平台，研究发生在地球、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、化学和生命等自然现象及其规律的科学[1]。2010年3月，国务院第105次常务会议审议通过了中国科学院（简称“中科院”）“创新2020”规划，决策部署中科院组织实施战略性先导科技专项（以下简称“先导专项”）。2011年1月，空间科学战略性先导科技专项（以下简称“空间科学先导专项”）作为中科院首批启动的先导专项之一正式立项实施，使得我国的空间科学第一次有了系统性的支持计划[2]。

“十二五”时期，空间科学先导专项首批实施的暗物质粒子探测卫星（以下简称“暗物质卫星”）、“实践十号”返回式科学实验卫星（以下简称“‘实践十号’卫星”）、“量子”科学实验卫星（以下简称“‘量子’卫星”）和硬X射线调制望远镜卫星（以下简称“HXMT卫星”）任务“四发四捷”，已经产出一系列重要成果，使中国逐渐成为国际空间

* 通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA15000000）
修改稿收到日期：2020年4月30日

科学领域一支重要的新兴力量[3]。2018 年 5 月 31 日，空间科学先导专项（二期）正式立项启动，瞄准宇宙和生命起源与演化、太阳系与人类关系两大科学前沿，部署实施太阳风—磁层相互作用全景成像卫星（SMILE）、先进天基太阳天文台卫星（ASO-S）、爱因斯坦探针卫星（EP）和引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星（GECAM）等空间科学卫星任务[4,5]（以下统称“空间科学任务”）。中科院国家空间科学中心作为空间科学先导专项的总体依托单位（以下简称“专项总体”），在组织实施空间科学任务过程中，积累了宝贵经验。

当前，空间科学事业正处于难得的蓬勃发展机遇期，需要审视空间科学任务的特点，梳理其管理实践和对策，遵循其发展规律，不断总结经验，对促进我国空间科学的长期可持续发展颇有裨益。

1 空间科学任务的“四个科学”特点

以中科院空间科学先导专项为例，空间科学任务研制和管理过程就是科学与技术、科学与工程有机融合、相互迭代并最终实现科学上的重大创新突破的发展过程。不同于应用卫星或商业卫星任务，空间科学任务的核心特点是科学驱动，具体表现为“四个科学”特点，即科学目标、首席科学家、科学载荷和科研院所。

（1）科学目标。每项空间科学任务都有明确的科学目标，并根据科学目标提出对工程各大系统的技术指标要求与使用要求，且从方案设计、工程研制、在轨测试及实验到任务完成，始终围绕科学目标的实现。科学目标是空间科学任务一切工作的出发点和落脚点[6]，而实现科学目标是空间科学任务的“初心”。因此，为了实现科学上的重大创新突破，必须从源头上确保科学目标的战略性、创新性、可行性、重大性和带动性[7]。这个指导思想贯穿空间科学任务从遴选、立项、研发到运行的始终[8]。

（2）首席科学家。每项空间科学任务都设立首席科学家岗位。首席科学家不仅是科学目标的提出者，而且是后续科学研究的实践者和组织者，是空间科学任务的“灵魂”[2]，其对任务的成败具有决定性的作用。

（3）科学载荷。科学载荷是获取科学数据和实现科学目标的“尖兵”[9]，是空间科学任务中最关键的组成部分，又被称为有效载荷。科学载荷往往极端复杂、技术难度极大、精度要求极高。科学载荷的配置、设计、研制是确保实现科学目标的关键。

（4）科研院所。空间科学任务的科学载荷、科学应用系统和地面支撑系统的研制单位及首席科学家所在单位大部分是承担前沿性基础科学研究的研究所或高等院校（以下统称“科研院所”）。这些单位研究基础扎实、技术前沿性强，是航天领域不可或缺的新生力量，但往往航天工程经验不足、不确定因素多，这使得空间科学任务在工程实现、质量管理和风险管控方面面临着挑战。

2 针对空间科学任务“四个科学”特点的管理实践

针对空间科学任务的“四个科学”特点，专项总体以任务生命周期为主线，在管理实践中执行“四个坚持”，促进科学与技术、科学与工程的有机融合，确保工程进度和质量，努力促进成果产出的最大化。

2.1 坚持以科学目标为牵引，始终不忘“初心”

在管理过程中，空间科学任务始终坚持科学驱动，以科学目标为牵引，重点抓战略规划、任务征集和任务遴选三大关键环节，确保遴选出的任务满足国家需求，具备瞄准重大科学前沿问题的重大性或具有相当的带动性。

2.1.1 抓战略规划，确保满足国家需求

中国航天持续响应环境形势的变化，在各个重大发展阶段都制定了明确的战略规划[10]。空间科学是航

天领域的三大支柱之一。空间科学任务体现国家意志和国家科技水平，其创新性、探索性、学科交叉性都很强，需要坚持战略规划先行。为此，2009 年，中科院组织空间领域战略研究组制定了《中国至 2050 年空间科技发展路线图》[11]；2016 年，国家自然科学基金委员会和中科院共同成立了空间科学战略研究组[12]。该研究组由中科院院士牵头，凝聚空间科学领域专家学者共同开展研究，确定了 21 世纪中叶前我国空间科学发展目标、关键科学问题和优先发展方向。

战略规划采取“自上而下”方式，把握国家需求，瞄准重大科学前沿，合理前瞻布局，确保未来实施的空间科学任务具有战略性、创新性、可行性。

2.1.2 抓任务征集，释放空间科技工作者的创新潜能

在空间科学任务建议书征集阶段，采取“自下而上”的征集方式，凝聚全国优势力量，充分发挥研究群体的积极性[7]；确保任务实施后的数据分析团队就是项目提出的科学团队，最大限度地保护其积极性和科学思想的一贯性。这充分释放了我国空间科技工作者的创新潜能，确保了科学产出和效益的最大化[8]。科学家提出的原创性科学构想，为空间科学领域部署重大科技项目和工程提供了源头输入，为推动空间科学、空间技术和空间应用的全面发展播下了“金种子”[13]。

2.1.3 抓任务遴选，确保任务科学目标的重大性和/或带动性

在空间科学任务遴选阶段，采用以科学目标重大性和/或对科学发展的带动性为核心的遴选标准[14]，包括：概念建议遴选、预先研究课题遴选、背景型号课题遴选、重大背景型号项目遴选，以及背景型号任务转入工程任务遴选。这些遴选都实践了“自下而上”、同行专家评议的遴选机制，确保择优进入下一阶段[8,13]。

另外，针对空间科学预先研究、背景型号任务，专项总体通过国际空间科学研究所-北京分部（ISSI-BJ）组织国际论坛，邀请国际相关前沿领域的科学家对候选任务的科学目标、技术需求和国际合作前景进行论证和咨询，对科学目标进一步凝练，确保科学目标的重大性和/或带动性。正在实施的 ASO-S、EP 和 SMILE 任务，在背景型号阶段均经过了国际咨询论证。

2.2 坚持以首席科学家为科学导向，发挥首席科学家的“灵魂”作用

围绕实现科学上的重大创新突破这一核心使命，空间科学任务管理实践中始终坚持以首席科学家为科学导向，坚守“灵魂”；首席科学家高度重视科学团队建设，激励团队发挥群体作用，同时协调工程研制，促进科学与技术的有机融合。

2.2.1 坚持以首席科学家为科学导向

在项目预先研究、背景型号研究和立项综合论证阶段，首席科学家处于主导地位。首席科学家带领科学团队凝练科学目标，遴选和配置有效载荷，并将科学探测的需求转化为工程初步技术指标要求与使用要求，在此过程中其发挥了关键和决定性作用[8]。尤其在立项综合论证阶段，首席科学家需要对科学目标进行进一步论证和凝练，并对方案和有效载荷的技术可行性开展进一步深化论证，确保科学目标的可实现性[7]；卫星发射入轨之后，首席科学家制定探测计划并参加在轨测试；卫星交付运行后，以首席科学家为核心开展工作，牵头负责数据的分析应用和成果产出。

2.2.2 首席科学家注重团队建设，激励团队发挥群体作用

解决管理复杂性问题要靠人或群体激发出的智慧[15]。空间科学卫星工程采用了“首席科学家+工程‘两总’”的组织管理模式，工程“两总”负责任务研制、发射和运行，即负责工程目标实现；首席科学家负责与科学目标实现相关的问题。

为了实现重大成果产出，首席科学家高度重视科

学团队建设，在任务开始时即开始组建科学团队。团队中设置了载荷科学家、合作科学家和客座科学家等岗位，并根据任务需要设立不同的研究组。工作中，首席科学家作为核心，激励团队发挥群体作用，实现“1+1>2”。在卫星发射后，首席科学家协调国内外研究力量，取得最大的科学产出。

2.2.3 首席科学家深度参与研制过程，协调工程研制

首席科学家深度参与工程研制，组织科学团队对数据进行模拟，对科学载荷的标定进行把关，制定探测或实验方案，密切跟踪、督导、见证和审核研制过程，发现和处理研制中出现的与科学目标相关的各类问题并做出判断。在保证科学目标的情况下，帮助工程总体协调接口参数；在工程研制的每个重要节点，只有得到了首席科学家认可的设计才能进入下一阶段。如果出现工程研制不能满足科学需求、影响科学目标实现的情况，首席科学家将组织分析研究，评估影响程度，并与工程“两总”协商解决工程技术问题。

2.2.4 搭建科学团队与工程技术团队交流平台，促进科学与技术的有机融合

空间科学任务研制队伍的特点是，科学团队具有前沿的创新思想，但往往缺乏工程理念，工程技术团队具有一定的工程经验，但往往缺乏科学思想；科学团队总有新创意，工程技术团队却追求稳定和低风险。

为了相互理解对方的语言，及时、准确地识别和化解风险，空间科学先导专项搭建了科学团队与工程技术团队沟通交流的平台。在工程早期阶段，科学家通过学术报告及座谈形式，帮助工程技术人员理解任务的科学目标及探测原理；科学家也仔细了解工程技术人员的设计思维和技术难度，听取其建议；同时，科学载荷的设计人员与卫星平台的工程设计人员密切沟通，反复迭代，找到最佳实现方案。通过科学家与工程技术人员间反复的沟通迭代，确保需求的准确性，以及设计、试验、 生产及标定的正确性，将科学目标快速渗透到卫星工程研制的各个层面和环节，实现科学与技术的有机融合。

2.3 坚持以科学载荷为抓手，促进科学与工程的有机融合

针对空间科学卫星和有效载荷的特殊性，在研制过程中通过提升载荷管理等级、采用载荷科学家制管理模式、突破关键技术等，确保研制质量和进度，促进科学与工程有机融合，降低技术风险。

2.3.1 提升载荷管理等级，工程、卫星和载荷三级总体共保载荷质量和进度

（1）设立载荷总体，统一管理有效载荷分系统。针对载荷研制单位普遍缺乏航天经验的实际情况，安排航天经验相对丰富的科研院所作为有效载荷分系统总体单位（以下简称“载荷总体”）。载荷总体负责有效载荷分系统的进度、质量、技术及经费的管理工作，便于统一管理和资源统筹，在载荷研制、试验和任务集成中发挥了重要作用。例如，“实践十号”卫星科学载荷多达 19 台套，涉及载荷研制单位 11 家。这些研制单位工程经验参差不齐，如何确保载荷研制既满足科学需求又满足工程要求？这是研制之初就面临的难题。在实施过程中，作为该卫星任务载荷总体，中科院国家空间科学中心通过精心组织载荷桌面联试，合理安排载荷工作流程，对发射场、在轨飞行及回收进行了周密的策划和组织，极大降低了后续整星测试、在轨飞行及回收任务中发生问题的风险——在卫星资源有限的情况下，使全部载荷均成功开展了在轨实验并获得大量有价值的科学数据。

（2）提升载荷管理等级，工程、卫星和载荷三级总体共抓载荷管理。工程总体协同卫星系统总体，制定有效载荷分系统年度考核节点，推行对有效载荷分系统的“过程跟踪、节点控制、里程碑考核”项目管理准则，细化监督、检查和考核的流程，重点关注关键计划节点、关键技术指标、质量控制点和技术风险点。加大对有效载荷分系统各阶段研制工作的管理力

度，加强现场跟产，尤其对“短线”项目，深入载荷研制单位和大型试验现场，实时掌握研制进展，密切跟踪问题处理情况和研制人员状态，及时了解、收集和分析质量问题相关的信息，现场协调、及时处理所遇到问题。尤其是进入正样研制阶段，要求对研制质量和进度管理细化到周报、“短线”日报，及时比对每天的完成工作情况，发现进度变化时及时进行进度控制，确保工程质量和进度。

2.3.2 采用载荷科学家制管理模式，激励科学创新，促进科学与工程的有机融合

空间科学任务的有效载荷采用载荷科学家制管理模式。载荷科学家相当于项目首席科学家助理，在有效载荷设计上实现科学家的思想，成为科学家与工程技术人员之间的桥梁和纽带。载荷科学家需要熟悉科学探测任务、清楚探测仪器原理、了解技术实现途径，与载荷研制单位共同开展有效载荷顶层设计，深度参与整个有效载荷的设计、研制、测试及在轨运行过程。

载荷科学家制管理模式可激励科学创新，提高科学探测任务的竞争性，缩短研制周期，促进科学与工程的有机融合。

2.3.3 突破载荷关键技术，降低技术风险

空间科学任务须攻克一系列的核心技术。对于一般的空间项目，在方案阶段末期必须完成关键技术攻关；否则，会因为后续阶段资金的大量投入而导致重大的经济、技术风险[16]。而对于空间科学任务，从预先研究、背景型号研究、立项综合论证、方案设计甚至到工程初样研制阶段，关键技术攻关始终是工程研制中的重要任务。空间科学先导专项（一期）各卫星突破了与载荷相关的一系列关键技术，确保了技术“见底”，降低了技术风险，满足了探测任务对载荷的超高要求。

2.3.4 拓展国际合作，确保载荷的先进性

针对短期内难以突破的先进载荷技术，寻求国际合作机会，利用他国的科技优势带动本国的科学技术发展，解决先进科学目标受制于载荷技术的短板。例如，中欧合作硅阵列探测器前端探测器研制（暗物质卫星）、中日合作空间熔体材料科学实验多功能炉研制（“实践十号”卫星）等，从而确保了载荷的先进性。

2.4 坚持以科研院所为依托，强调工程质量管理

空间科学任务的强烈探索性决定了其主要以科研院所为依托。为了迎接质量管理和风险管控方面面临的挑战，空间科学任务尤其强调工程质量管理。

2.4.1 以科研院所为依托

中科院是中国自然科学最高学术机构、科学技术最高咨询机构、自然科学与高技术综合研究发展中心。作为科技创新的国家队，中科院是我国最早进行空间科学研究和卫星研制的单位之一，代表了我国空间科学界的绝大部分科研力量。我国数千名空间科学领域的科学家中有70%以上分布在中科院所属科研院所[17]。这些研究所和高校一起作为我国空间科学探索的主力军，对所倡议的空间科学项目提出科学目标，承担大量载荷的研制，是科学数据的主要用户和科学成果的产生地，在人才、智慧、技术、设施等方面对空间科学任务发挥着重要的依托作用。

2.4.2 强调工程质量管理

对科学目标而言，没有质量的进度意味着宝贵资源的浪费，没有进度的质量意味着科学目标的牺牲[2]。空间科学先导专项针对科研院所的现实情况，以及在工程实现、质量管理和风险管控方面面临的挑战，始终牢记“质量是航天的生命线”的指导思想，遵循“单位抓体系，型号抓大纲，设计抓质量可靠性”的基本策略[10]，在工程质量管理中实施 4 项重点措施。

（1）推动质量管理体系建设，确保全过程质量可控。空间科学先导专项探索并形成了独具特色的质量管理模式[18]，制定了《空间科学卫星工程质量管理总要求》等系列顶层管理文件，建立了专项的质量

管理体系和产品保证体系。在管理实践中，针对没有通过质量体系认证的研制单位，专项总体要求其必须按照 GJB 9001B 或 GB/T19001 建立、健全质量管理体系，确保有效运行，并在产品转入正样研制前通过质量体系认证；对已建立质量管理体系的单位，要求其在实践中不断完善，持续改进。这有力推动了相关单位质量管理体系的科学化、规范化和信息化。通过有效的制度建立、体系管理和持续改进，确保工程研制全过程质量可控，确保产品的质量。

（2）坚持常态化培训，提升全员质量意识。针对科研院所人员队伍新、航天工程经验不足的特点，在工程各阶段，专项总体邀请国内外航天领域专家就工程阶段研制工作的重点、风险点及应关注的问题等进行培训；同时，有针对性地组织质量、软件工程化、技术状态管理、风险管理、航天工程理念及系统工程方法等的专题培训，并对空间科学先导专项制定的质量体系文件进行宣贯，提升全员的质量意识。另外，各级任务承担单位也开展了形式多样的分层分类的培训措施，持续加强队伍技能建设。通过工程实战与培训提高相结合，努力打造一支“严慎细实”敢打硬仗的航天队伍。

（3）开展专项质量检查，确保不带问题转段。在各工程项目重要里程碑节点前，专项总体充分调研情况，按照精细化管理的要求，组织国内外相关领域专家开展专项质量检查，对工程质量等提出意见和建议，为工程转阶段决策提供必要的输入条件，确保有效载荷和卫星不带问题转段和出厂、不带疑点上天。

（4）组织重大风险项目独立评估，有效降低研制风险。针对工程项目技术复杂、协作面广、队伍新、风险大、质量与可靠性要求高等特点，为强化过程管理、提高风险控制能力，专项总体策划、组织了重大风险项目独立评估工作，组织质量与可靠性、软件工程化等相关领域专家对“量子”卫星和暗物质卫星初样研制阶段重大风险项目开展了独立评估。通过独立评估，有效解决了卫星研制中的难题，降低了技术风险，提升了产品质量。另外，借力中科院重大任务监理部，全力配合监理组对工程研制过程中的重要环节进行现场监理，对进度、技术、质量等目标进行监督检查，对存在的问题与风险提出建议，并督促闭环落实，促进了进度、技术、质量工作的落实。

3 进一步提升管理能力的思考

当前，空间科学事业方兴未艾，任重道远，通过审视空间科学任务特点，梳理其管理实践和对策，有助于提升管理能力，对我国空间科学长期可持续发展颇有裨益。为确保后续任务持续取得重大创新突破，就首席科学家和科研院所相关工作提出 2 点建议。

（1）坚持首席科学家研讨班机制，促进其尽快融入角色。在当前空间科学任务中，为了更好地将科学需求转换为最合理的工程需求，在立项综合论证阶段，专项总体邀请国内外航天领域的资深专家就卫星工程全生命周期研制流程、系统工程管理、科学团队建设及重大成果产出策划等与拟任首席科学家进行充分研讨和交流，达到了很好效果。在后续工作中，可将此成功做法形成常态化机制，对不断涌现的空间科学任务和年轻首席科学家，可通过首席科学家研讨班，帮助首席科学家弥补工程管理经验之不足，使其尽快熟知系统工程的管理程序、明晰工程各阶段的关注点，促进其尽快融入角色、充分发挥职能。

（2）科研院所尽早建立质量体系，确保产品质量。质量认识不到位和质量管理措施不到位是科研院所存在的常见问题，因此空间科学任务在完善质量管理体系、推进产品保证和质量可靠性技术等面临挑战[18]。在空间科学先导专项（一期）研制过程中，部分载荷研制单位在工程转正样前才通过质量管理体系认证。在后续工程管理中，任务承担单位应尽早建立质量管理体系并通过认证，为产品研制尽早构筑组织、资源、产品实现的质量保证基础平台；尽早将卫

星工程质量与可靠性指标和产品保证活动纳入系统研制计划并予以实施，使质量管理体系与工程质量工作有机衔接，解决两者脱节的问题，确保采用统一的质量管理标准进行产品生产，确保产品质量。

致谢 感谢中国科学院国家空间科学中心吴季、中国科学院紫金山天文台常进和国家航天局郭宝柱在本文撰写过程中给予的指导。

参考文献

1 吴季, 孙丽琳, 尤亮, 等. 2016—2030年中国空间科学发展规划建议. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 707-720.

2 相里斌. 发展空间科学 建设航天强国. 中国科学报, 2018-07-06(01).

3 吴季. 空间科学规划及对航天运输系统的需求. 宇航总体技术, 2018, (2): 17-21.

4 Wu J, Wang C. Progress of strategic priority program on space science. [2018-09-06]. http://english.nssc.cas.cn/ns/NU/201809/W020180906583000443484.pdf.

5 Normile D. China announces new flotilla of space science missions. Science, 2018, 361: 116-117.

6 曹松, 李自杰. 发展科学卫星的管理复杂性. 科技导报, 2018, 36(12): 8-12.

7 吴季. 空间科学任务的全价值链管理和产出评估. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 206-213.

8 吴季. 空间科学任务及其特点综述. 空间科学学报, 2018, 38(2): 139-146.

9 吴季. 空间科学——我国创新驱动发展的重要阵地. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 583-589.

10 郭宝柱. 航天组织管理的系统思维与系统工程方法. 科技导报, 2018, 36(20): 38-42.

11 中国科学院空间领域战略研究组. 中国至2050年空间科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.

12 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略 · 空间科学. 北京: 科学出版社, 2019.

13 曹松, 李明, 张晓雯. 中国空间科学任务概念建议征集完成. 空间科学学报, 2017, 37(4): 378.

14 Wu J, Bonnet R. Maximize the impacts of space science. Nature, 2017, 551: 435-436.

15 钱学森. 关于大成智慧的谈话// 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001: 66-73.

16 郭宝柱. 空间项目的研制程序——循序渐进的研制过程. 航天器工程, 2014, 23(2): 1-6.

17 姜天海. 空间科学：创新驱动发展的重要阵地——对话中科院国家空间科学中心主任吴季. 科学新闻, 2015, (18): 91-96.

18 林柯妡. 空间科学卫星工程质量管理方法探索与实践. 质量与可靠性, 2016, (2): 15-18.

"4S" Characteristics and Management Practice of Space Science Mission in China

—Case Study on Strategic Priority Research Program on Space Science of the Chinese Academy of Sciences

LI Chao* ZHENG Yaoxin

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract It is pointed out that the core characteristic of China's space science mission is science driven, which is embodied in "four science" characteristics, namely, scientific objective, chief scientist, scientific payload, and scientific research institute. This paper expounds the management practice aiming at the characteristics of the "four science", that is, to persist in taking the scientific objective as the traction, the chief scientist as the scientific direction, the scientific payload as the grasp, scientific research institute as the support; to promote the organic integration of science and technology, science and engineering; to ensure the progress and quality of the project; and to strive to promote the maximize output of the mission. By examining the characteristics of space science missions, combing management practices and countermeasures and putting forward suggestions for follow-up mission management, it is helpful to further enhance management capabilities and to the long-term sustainable development of space science in China.

Keywords space science mission, scientific objective, chief scientist, scientific research institute, scientific payload, Strategic Priority Research Program on Space Science



李 超 中国科学院国家空间科学中心副研究员。主要从事中国科学院空间科学战略性先导科技专项及科学卫星工程总体管理和研究。E-mail: chaoli@nssc.ac.cn

LI Chao Associate Professor of National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences (CAS). He Mainly engages in the overall management and research of CAS Strategic Priority Research Program on space science and space science satellite projects. E-mail: chaoli@nssc.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

* Corresponding author

参考文献（双语版）

1 吴季, 孙丽琳, 尤亮, 等. 2016—2030年中国空间科学发展规划建议. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 707-720.

Wu J, Sun L L, You L, et al. Prospect for Chinese space science in 2016-2030. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 707-720. (in Chinese)

2 相里斌. 发展空间科学 建设航天强国. 中国科学报, 2018-07-06(01).

Xiang L B. Develop space science and build a great country in aerospace. China Science Daily, 2018-07-06(01). (in Chinese)

3 吴季. 空间科学规划及对航天运输系统的需求. 宇航总体技术, 2018, 2(2): 17-21.

Wu J. Space science planning and its demand for space transportation system. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(2): 17-21. (in Chinese)

4 Wu J, Wang C. Progress of strategic priority program on space science. [2018-09-06]. http://english.nssc.cas.cn/ns/NU/201809/W020180906583000443484.pdf.

5 Normile D. China announces new flotilla of space science missions. Science, 2018, 361（6398）: 116-117.

6 曹松, 李自杰. 发展科学卫星的管理复杂性. 科技导报, 2018, 36(12): 8-12.

Cao S, Li Z J. The complexity of the management in developing space science satellites. Science & Technology Review, 2018, 36(12): 8-12. (in Chinese)

7 吴季. 空间科学任务的全价值链管理和产出评估. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 206-213.

Wu J. Full value chain management and science outputs evaluation of space science missions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 206-213. (in Chinese)

8 吴季. 空间科学任务及其特点综述. 空间科学学报, 2018, 38(2): 139-146.

Wu J. Characteristics and managements of space science missions. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(2): 139-146. (in Chinese)

9 吴季. 空间科学——我国创新驱动发展的重要阵地. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 583-589.

Wu J. Space science as an important driving momentum toward nation’s independent innovation development. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(5): 583-589. (in Chinese)

10 郭宝柱. 航天组织管理的系统思维与系统工程方法. 科技导报, 2018, 36(20): 38-42.

Guo B Z. Systems thinking and systems engineering in aerospace. Science & Technology Review, 2018, 36(20): 38-42. (in Chinese)

11 中国科学院空间领域战略研究组. 中国至2050年空间科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.

Research Group on Space Science & Technology, Chinese Academy of Sciences. Space Science & Technology in China: A Roadmap to 2050. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

12 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略·空间科学. 北京: 科学出版社, 2019.

National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China’s Discipline Development Strategy: Space Science. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

13 曹松, 李明, 张晓雯. 中国空间科学任务概念建议征集完成. 空间科学学报, 2017, 37(4): 378.

Cao S, Li M, Zhang X W. Proposal solicitation for China space science mission concepts completed. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(4): 378. (in Chinese)

14 Wu J, Bonnet R. Maximize the impacts of space science. Nature, 2017, 551(7681): 435-436.

15 钱学森. 关于大成智慧的谈话// 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001: 66-73.

Tsien H S. Talk about theory of meta-synthetic wisdom//

Creating Systems Science. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House, 2001: 66-73. (in Chinese)

16 郭宝柱. 空间项目的研制程序——循序渐进的研制过程. 航天器工程, 2014, 23(2): 1-6.

Guo B Z. Space project development phase—A progressive development process. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 1-6. (in Chinese)

17 姜天海. 空间科学：创新驱动发展的重要阵地——对话中科院国家空间科学中心主任吴季. 科学新闻, 2015, (18): 91-96.

Jiang T H. Space science as an important position for innovation-driven development: A dialogue with Wu Ji, Director of the National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences. Science News, 2015, (18): 91-96. (in Chinese)

18 林柯妍. 空间科学卫星工程质量管理方法探索与实践. 质量与可靠性, 2016, (2): 15-18.

Lin K X. Method exploration and practice of satellite engineering quality management. Quality and Reliability, 2016, (2): 15-18. (in Chinese)